

学校编码: 10384
学号: B200430005

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

小型潜艇的水声语音通信研究

**Research of Underwater Acoustic Speech Communication
on Shallow Water Attack Submarine**

高春仙

指导教师姓名: 许克平 教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2007 年 月

论文答辩时间: 2007 年 月

学位授予日期: 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 (☒), 在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名: 日期: 年 月 日

导师签名: 日期: 年 月 日

中文摘要

海洋是人类发展中继陆地之后的第二大空间，是各种资源的战略性开发基地；海上航运为国家经济贸易的运输大动脉。中国是个海洋大国，海洋权益的维护对我国国家安全与社会经济的可持续发展产生着直接、巨大的支撑作用。海洋权益的维护主要依靠海上军事力量的建设。

小型潜艇 SWATS (Shallow Water Attack Submarine) 作为“非对称作战”思想的产物，其主要的任务是输送与配合潜水突击队员进行水下攻击。要实现协同作战，机动灵活的完成作战任务，各作战单位间的相互通信就显得尤为重要。

水下通信领域，声波是目前实现中、远距离无线通信唯一有效的信息载体。而由此构成的水声信道是一个空间与频率响应随机快速变化的传输信道，存在窄带、高噪及强多途干扰。其中复杂多变的海洋环境所造成的多途径干扰与环境噪声给可靠有效的水声通信系统带来很大的困难。

本研究是基于某应用单位预研项目选题的，主要任务是实现 1Km 距离内的水下语音通信样机。论文针对目前主流产品（调幅单边带 SSB 通信体制）存在的通信质量不高、语音模糊不清等问题，进行了理论分析与仿真验证。结合水声信道的物理特性，论文建立时变多径频率选择性衰落的水声信道模型。基于该信道模型，进行多径环境与环境噪声条件下调频与调幅单边带通信体系的性能仿真。论文以理论分析与仿真数据为指导，围绕调频通信体系构建水下语音通信样机。在接收端为进一步优化接收语音质量，论文自行设计与实现话语间噪声抑制模块。

系统样机通过实验室与厦门港浅海的现场测试，测试数据表明论文样机完全满足预期设定的各项研制指标，样机具有先进的技术水平。为我国研制具有自主知识产权的小型潜艇水声通信设备打下重要基础。

关键词：水声信道；调频通信；调幅单边带

Abstract

Full of all kinds of resources and huge bearing capacity of international cargo shipping, ocean is becoming second biggest development place of human being. Exploration and protection of ocean resources play an important role in national security and sustainable society and economy development, especially to China which has vast sea dominion. Development and equipment of navy armament is significant way to maintain the ocean rights and interests.

Based on Asymmetric Engagement, function of shallow water attack submarine (SWATS) is to transport divers and cooperate with divers. Communications among divers and SWATS is an essential part to fulfill attack mission smoothly and flexibly.

Sound is the only effective information carrier for medium of long distance wireless communication on underwater. Underwater acoustic channel is a time-space-frequency variant channel, having a character for narrow bandwidth, high ambient noise level and strong interference of multipath. Interference of multipath and ambient noise set up the barrier to effective and reliable communication system on underwater.

Upon the request from some institution, the research is conducted to achieve the objective of developing an underwater speech communication device which function range is among 1 kilometer. Contrapose to mainstream communication system and its defects, theoretical analysis and simulation verification are carried out. According to physical knowledge of underwater acoustic channel, a variant frequency-selective-fading multipath underwater channel model is built up. Base on the channel model, performance of both FM(frequency modulation) system and SSB(single side band) system under mutipath situation and ambient noise situation is simulated. Following theoretical analysis and simulation result, an underwater speech communication system is designed and performed in which FM technology is implemented. To improve speech quality further, noise cancel module is designed and realized on receiver side.

The performance of system has been investigated both in the laboratory's pool and on sea trials in real ocean environment at Xiamen harbor. The results indicate the underwater speech communication system has better speech communication quality and comparative function range with mainstream product, and demonstrate that the objective of the research is achieved. The research is becoming a important platform of SWATS speech communication system with autonomous intellectual properties.

**Key Words: Underwater Acoustic Channel; FM communication;
SSB communication**

目录

第一章 绪论	1
1. 1 课题的选题背景和研究意义	1
1. 2 国内外研究的进展与装备现状	2
1. 2. 1 国内研究和装备现状	2
1. 2. 2 国外研究和装备现状	3
1. 3 论文各部分的主要内容	6
第二章 通信系统概述	8
2. 1 通信系统的组成	8
2. 2 模拟通信与数字通信	9
第三章 浅海水声信道的物理特性	11
3. 1 海洋中的声速	11
3. 1. 1 声速经验公式	12
3. 1. 2 海中声速分层剖面	13
3. 2 声在海水的传播损失	14
3. 2. 1 扩展损失——波阵面的扩展	14
3. 2. 2 吸收损耗	15
3. 3 海面对声传播的影响	17
3. 4 海底对声传播的影响	19
3. 5 海洋内部的不均匀性	21
3. 6 水下噪声	22
3. 6. 1 海洋的自然噪声	22
3. 6. 2 舰船噪声	27
3. 7 海中混响	27
3. 8 声呐方程	29
3. 8. 1 声呐参数	29
3. 8. 2 声呐方程	31
第四章 调频技术概述	34
4. 1 调频信号	34
4. 2 调频信号的产生	35
4. 2. 1 直接调频法	36
4. 2. 2 间接调频法	41
4. 3 调频信号的解调	44
4. 3. 1 限幅器	44
4. 3. 2 常规鉴频器	47
第五章 调频系统性能分析	53
5. 1 调频信号的频谱	53
5. 2 调频信号的带宽	59
5. 3 调频接收强信号抑制弱信号	60
5. 4 调频系统的抗噪声性能	66

5. 5 浅海水声信道调频系统的性能分析.....	69
5. 5. 1 信道模型.....	69
5. 5. 2 系统仿真模型.....	73
5. 5. 3 系统仿真数据.....	76
5. 6 调频系统性能总结.....	82
5. 7 探索调频语音通信用于浅海域水声信道.....	83
第六章 语音声学.....	85
6. 1 人耳的构造与功能.....	86
6. 2 人耳的听觉范围.....	86
6. 3 音调.....	87
6. 3 响度.....	87
6. 4 音色.....	88
6. 5 人耳的辨别阈.....	89
6. 6 人耳听觉效应.....	89
6. 7 重发声的失真感觉度.....	90
6. 8 语音发音系统及其等效模型.....	91
6. 9 语音的声源特性.....	93
第七章 水声语音通信样机研制.....	95
7. 1 水声语音通信样机发射端部分样机研制.....	95
7. 2 水声语音通信样机接收端部分样机研制.....	101
7. 3 水声语音通信样机试验数据及分析.....	106
7. 3. 1 实验室水槽试验.....	107
7. 3. 2 厦门港区浅海试验.....	110
7. 4 试验结论.....	114
第八章 工作总结与展望.....	116
8. 1 研究工作总结.....	116
8. 2 论文创新之处.....	117
8. 3 研究工作展望.....	117
参考文献.....	118
致谢.....	122
附录 I.....	123
附录 II.....	124
攻读博士学位期间发表的学术论文.....	126

Contents

Chapter 1 Preface.....	1
1. 1 Introduction.....	1
1. 2 Current situation and progress at home and abroad.....	2
1. 2. 1 Current situation and progress home	2
1. 2. 2 Current situation and progress abroad	3
1. 3 Structure of the thesis.....	6
Chapter 2 Introduction of communication system.....	8
2. 1 Structure of communication system.....	8
2. 2 Analog and digital communication system.....	9
Chapter 3 Physical character of shallow water acoustic channel....	11
3. 1 Sound velocity in sea water	11
3. 1. 1 Empirical formula of sound velocity	12
3. 1. 2 Sonic layer structure in sea water	13
3. 2 Acoustic transmission loss.....	14
3. 2. 1 Expansion loss	14
3. 2. 2 Absorption loss.....	15
3. 3 Acoustic transmission influence of sea-surface.....	17
3. 4 Acoustic transmission influence of subseafloor	19
3. 5 Inhomogeneity of sea water.....	21
3. 6 Underwater noise	22
3. 6. 1 Natural underwater noise.....	22
3. 6. 2 Ship noise.....	27
3. 7 Reverberation.....	27
3. 8 Sonar equation	29
3. 8. 1 Sonar parameters.....	29
3. 8. 2 Sonar equation	31
Chapter 4 Introduction of FM technology.....	34
4. 1 FM signal expression.....	34
4. 2 FM modulation.....	35
4. 2. 1 Direct modulation	36
4. 2. 2 Indirect modulation.....	41
4. 3 FM demodulation.....	44
4. 3. 1 Amplitude limiter.....	44
4. 3. 2 Conventional FM demodulation	47
Chapter 5 Performance of FM system.....	53
5. 1 Spectrum of FM signal.....	53
5. 2 Bandwidth of FM signal	59
5. 3 Suppression between strong and weak receiving signal	60
5. 4 Anti-noise performance of FM system	66

5. 5 Performance analysis of under shallow-water FM communication system	69
5. 5. 1 Channel model	69
5. 5. 2 Communication simulation model	73
5. 5. 3 Results of simulation	76
5. 6 FM system performance summary	82
5. 7 FM speech communication under shallow water channel	83
Chapter 6 Acoustic character of voice	85
6. 1 Structure and function of human ears	86
6. 2 Human auditory range	86
6. 3 Tone	87
6. 3 Loudness	87
6. 4 Tamber	88
6. 5 Differential threshold	89
6. 6 Auditory effects	89
6. 7 Auditory distortion of replay voice	90
6. 8 Pronunciation system and equivalent model	91
6. 9 Speech pronunciation character	93
Chapter 7 Implementation of underwater speech communication system	95
7. 1 Transmission part	95
7. 2 Receive part	101
7. 3 System experiments and results analysis	106
7. 3. 1 Laboratory experiments	107
7. 3. 2 Xiamen harbor trials	110
7. 4 Experimental conclusion	114
Chapter 8 Summary and future work	116
8. 1 Research Summary	116
8. 2 Innovations in the dissertation	117
8. 3 Further research	117
References	118
Acknowledgement	122
Appendix I	123
Appendix II	124
Research and achievement during pursuing PhD degree	126

第一章 绪论

2500 多年前，古希腊海洋学家狄米斯·托克利曾说：谁控制了海洋，谁就控制了一切。海权论的创立者美国海军少将马汉则说：任何一个国家，要想成为强国，首先要控制海洋。中国明代伟大的航海家郑和也曾精辟地指出：欲国家富强，不可置海洋于不顾，财富取之于海，危险亦来自海上。这些都说明，海洋对于一个国家的安全和强盛是何等的重要。

随着现代海洋技术的迅速发展，人们对海洋有了更为全面的了解。据探测，海底蕴藏的石油储量与天然气储量约为陆地总储量的 3 倍；潮汐能、海浪能等可供开发利用的能量在千亿瓦量级，相当于目前全世界发电总量的十几倍；海上运输线担负着全世界 90% 的国际贸易额运量，堪称世界经济的大动脉。

中国是个海洋大国，300 万平方公里的海域，1.8 万公里大陆海岸线，1.4 万公里的岛屿海岸线，位居世界第四；所辖大陆架面积位居世界第五；海洋经济专属区面积世界第十^[1]。“我国是一个陆地大国，也是一个濒海大国……。开发和利用海洋，对于我国的长远发展将具有越来越重要的意义”^[2]。

海洋蕴藏着巨大的资源，而与诱人资源相伴的是激烈的海洋权益之争。海洋法告诉人们：在海洋权益上，可以守住自己的，分享公有的。现实的海洋政治也同样告诉人们：如果没有强大的军事实力，特别是强大的海上力量做后盾，那么，很有可能既守不住自己的，更分享不了公有的。因此，为了维护我国合法的海洋权益，维护国家的繁荣富强，必须加强海防建设。

1. 1 课题的选题背景和研究意义

随着世界军事理论的发展，“非对称作战”随着海湾战争的进行而得以提出。其特定含义就是：与强敌对抗的一方，为掌握战略或战役主动权，从自己处于劣势的情况出发而采取的避开强敌高技术武器的强点，击其弱点的一种作战方式或作战指导思想^[3]。浅水攻击潜艇 SWATS（Shallow Water Attack Submarines）（或称为小型潜艇）与蛙人运载器 SDVs（Swimmer Delivery Vehicles）就是基于这样的思想提出的。SWATS 的主要任务是输送 15 名潜水突击队员，并配合他们进行

水下攻击；SDVs 可装载 2 名蛙人和战斗载荷，由母船释放，完成任务后返回^[4]。SWATS 与 SDVs 为特种作战所需的装备，它们可以在不易察觉的情况下进行登陆，或 directly 对港口、舰船进行破坏与威慑，也可用于进行秘密缉捕的恐怖或反恐怖活动。运用小型潜艇和蛙人运载器进行作战是“非对称作战”的一种具体体现。

要实现协同作战，机动灵活的完成作战任务，各作战单位间的**相互通信就显得尤为重要**。水下是个很特殊的作战场所。光波在水中的衰减很严重，其辐射能量随观察距离的增加而指数衰减^[5]；浅海域由于江河入海与人类活动，海水较为浑浊、杂质浓度较高，光波散射吸收严重；加之作战装备所要求的作用距离与全天候使用；因而在水下战场中通过视距进行简单肢体交流是不可行的。传统的无线电波在水中的衰减很大，即使采用 ELF 频段，无线电波在水中的穿透深度也只有数百米；而存在着发射功率为兆瓦级、发送基阵占地面积大并且无法实现双向通信等缺点；因而无线电波通信在该研究领域也无法采用。在浑浊与含盐的海水中，声波的衰减远小于光波与无线电波，被认为是水下通信优良的传输载体。因此，SWATS 艇间的通信与蛙人间的互动，**自然就落在了水声通信上**。

本论文是针对导师承担的某重要单位的“十一·五”预研项目来选题的，目标是实现 1Km 范围内，实时清晰的水下语音通信样机。论文研究的军事意义不言而喻，对促进我国军事技术的发展，加强国防力量，打击海上恐怖活动，确保国家海上权益都有积极意义。

1. 2 国内外研究的进展与装备现状

1. 2. 1 国内研究和装备现状

军事上，目前国内海军该领域现役设备是从外国进口的，采用模拟调幅单边带（SSB, Single Side Band）的语音通信机，其相关技术资料未见报道。由于海洋水声环境复杂多变、多途径情况严重，现役设备通信质量难以保证，大多数情况语音模糊不清。

国内高校、科研院所、企业等也有在从事相关的研究，但是在这个领域未见有相关文字报道。从公开的文献资料来看，该领域在国内尚属前沿。

1. 2. 2 国外研究和装备现状

目前国外海军在该领域采用的通信设备，也是模拟调幅单边带的语音通信机。下表是美国海军现役该领域通信设备 SCUBAPHONE VOX 的技术资料^[6]。该系统分为 1080D 型和 2000S 型两种型号，1080D 型主要用于潜艇或潜水员，2000S 型主要用于水面舰船或固定水下通信站。

表 1-1 美国海军装备的 SCUBAPHONE VOX 技术参数

	1080D 型	2000S 型
工作频率	USB28.5kHz±1Hz	USB28.5kHz±1Hz
调制方式	单边带载波抑制	单边带载波抑制
发射机激活方式	VOX / PTT	PTT
发射声功率	5W	5W
接收机增益控制	自动控制	自动或人工控制
海水中有有效范围	3Km	3Km
海水中最大工作深度	100m	100m
电池类型	12V 密封充电电池	12V 密封充电电池或外接
连续工作时间	10h	30h
工作温度	-20~70℃	-20~70℃
空气中重量	4.5kg	10kg
水中总量	0.5kg	有浮力

VOX: Voice-Operated Transmit

PPT: Push To Talk

国外的 OTS (Ocean Technology Systems) 公司与 OceanReef 公司都在从事这方面的研究，并且都有成熟的产品。

OTS 是一家专门从事水下通信的公司，可同时提供有缆与无线水下通讯器材，涉及的主要领域有水下体育运动、商业海洋作业、搜索营救、电影娱乐业及军事装备产品。由于该公司产品的多样化，本文在此就列举一些该公司典型产品的技术资料，详细各商品的技术参数请参见该公司的网站^[7]。该公司民用产品主要为 Buddy Phone 系列；军品系列包括：Aquacom 系列、MAGNACOM 系列与 Digicom 系列，下面为它们的主要技术参数^[7]。

表 1-2 OTS 公司 Buddy Phone 系列产品技术参数

Buddy Phone 技术参数	
作用距离	50m-500m (取决于海况与噪声强度)
作用深度	40m/130ft

工作频带	32.768 kHz USB
话音频带	300Hz-3000Hz
自动增益控制	$\geq 80\text{dB}$
发射声功率	0.5W
电池类型	9V 碱性电池或 9.6V 镍氢电池

表 1-3 OTS 公司 Aquacom 系列产品技术参数

Aquacom SSB 技术参数	
作用距离	1001B 型: 1500m (平静海面) 150m (六级海况) 2010 型: 1000m (平静海面) 100m (六级海况)
作用深度	40m/130ft
工作频带	1001B 型: 25-31kHz 2010 型: 31-33kHz
话音频带	300Hz-4000Hz
发射声功率	1001B 型: 10 W 2010 型: 3 W
接收灵敏度	-110 dB
自动增益控制	120 dB
发射激活方式	VOX / PTT
电池类型	8V 碱性电池或镍氢电池
持续工作时间 (占空比 10%)	碱性电池: 12h 镍氢电池: 13h

表 1-4 OTS 公司 MAGNACOM 系列产品主要参数

MAGNACOM 技术参数	
作用距离	通道 A: 6000m (平静海域) 1000m (六级海况) 通道 B: 1000m (平静海域) 100m (六级海况)
最大作用深度	90m/300ft
工作频带	通道 A: 28.5kHz LSB 通道 B: 32.768kHz USB
话音频带	300Hz-4000Hz
发射声功率	70 W(PEP: peak envelope power)(通道 A)
接收灵敏度	-110 dBv
自动增益控制	120 dB
发射激活模式	VOX / PTT
电池类型	12V 镍氢电池(2 安时)
持续工作时间	通道 A: 4h

	通道 B: 8h (占空比 10%) 待机: 14h
--	-------------------------------

表 1-5 OTS 公司 Digicom 1000DU 产品技术参数

Digicom 1000DU 技术参数	
作用距离	1500m (平静海面) 300m (六级海况)
工作频带	通道 A: 32.768kHz USB 通道 B: 31.250kHz LSB
话音频带	300Hz-4000Hz
发射声功率	5 W
接收灵敏度	-110 dBv
自动增益控制	120 dB
发射激活模式	VOX / PTT
电池类型	12V 镍氢电池(3 安时)
持续工作时间	12h (占空比 10%)

OceanReef 公司致力于提供安全舒适的潜水设备，水下语音通信只是该公司系列产品中的一个部分。该公司水声语音通信产品型号与技术指标参见下表。

表 1-6 OceanReef 公司主要产品型号与技术指标^[8]

产品型号	GSM	GSM DC	M101A	M-105 Digital	M-105 Digital DC
调制模式	H-SSB				
工作频带	32.768kHz	通道 1: 32.768kHz 通道 2: 41.000kHz	32.768kHz	32.768kHz	通道 1: 32.768kHz 通道 2: 41.000kHz
发送激活	PTT	PTT	只接收	PTT	PTT
工作距离	200m/600ft				
工作深度	40m/120ft				
电池类型	9V 碱性电池			6V 铅酸蓄电池	
工作时间	10h	9h	10h	48h	48h

国外的高校与科研院所也在从事水下语音信息的传输研究，并致力于将数字通信应用到该研究领域，获得了一定的研究成果。

法国的大西洋潜艇研究集团 GESMA (Group d'Etudes Sous-Marines de

l'Atlantique) 与法国布列塔尼电信学院(ENST-Bretagne)联合开发了一个 TRIDENT(Transmission de Donnees EN Temps reel)水声通信系统。该系统于 1994 年与 2003 年在 Brest 海湾进行了海上试验,可进行实时的图像、文本及语音信息的传输。TRIDENT 系统将语音进行 CELP(Code Excited Linear Prediction)编码(获得的语音编码数据率为 5.45kbps);然后加上相应的同步处理(数据率为 6.7kbps,没有采用信道纠错);以 QPSK 为调制方式,使用的载波频率为 20kHz;接收端采用垂直相距 25cm 的 4 个全指向性换能器构成接收阵列;接收端进行盲均衡处理与恢复;系统最终的作用距离为 2Km。^[9-10]

英国拉夫堡大学(Loughborough University of Technology)也在从事水下语音数字传输的研究。他们采用 LPC(Linear Predictive Coding)对语音进行压缩编码(2.4kbps 的数据率);采用 3 比特的 DPPM(Digital Pulse Position Modulation)进行调制;采用的载波频率为 70kHz;作用的距离为 100 米,测试的环境为水池^[11-12]。

1.3 论文各部分的主要内容

第一章,阐述本研究的意义与选题背景;介绍了国内外在该领域研究与装备的现状,特别介绍了美国海军现役装备的技术指标与 OTS 公司在该领域的主要产品的技术指标;最后给出了论文各部分的主要内容。

第二章,简要介绍了通信系统的基本模型,并围绕通信质量指标回顾了模拟与数字通信的发展过程与特点,给出了通信系统的性能指标。

第三章,介绍水声信道的物理特性。围绕信道物理特性对通信性能的影响,介绍传播声速、传输损耗、界面发射、介质混响、环境噪声等。最后给出通信系统的声呐方程并进行了讨论。

第四章,介绍调频通信系统的组成,给出了调频信号的表达式,并对调制与解调的实现技术进行具体的介绍。

第五章,分析与讨论了调频通信系统的性能。着重讨论了多径传输下调频接收的干扰,并给出具体的数学表达式。针对水声信道的物理参数,构建了时变多径频率选择性衰落的水声信道模型。在该模型基础上,对调频与调幅单边带的通信性能进行了仿真与讨论。

第六章，简要介绍语音与听觉的基础知识，涉及人耳听觉的物理参数、人耳听觉的心理效应、语音发音特点等。

第七章，介绍样机的具体构成并对试验数据进行了分析处理。论文详细的介绍样机组成的各模块的工作原理与实现方式；对实验室与厦门港浅海测试的数据进行了分析与讨论。

第八章，对论文工作进行总结，指出论文创新之处，提出系统完善的方法及未来研究工作开展的方向。

厦门大学博硕士论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库